

不一致特徴点の信頼性評価を用いた指紋照合

中村 高宏[†] 前田 卓志[†] 松下 雅仁[†]

[†]三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

E-mail: [†]{Nakamura.Takahiro@ah, Maeda.Takuji@dh, Matsushita.Masahito@ak}.MitsubishiElectric.co.jp

あらまし 指紋認証装置はコストの性能のバランスのよいバイオメトリクス認証技術として最も普及している。本報告では、指紋特徴点の照合処理において、照合相手指紋の特徴点と一致しない特徴点（不一致特徴点）を従来のように一律に切り捨てるのではなく、不一致特徴点に対しても「真の相手側特徴点と一致しない真の特徴点かどうか」を示す「真の不一致特徴点らしさの信頼度（不一致信頼度）」を評価して照合スコアに反映することにより、他人指紋の判別精度を向上するという照合方式を提案する。実験により、不一致特徴点を真偽評価なしに一律に扱う従来の照合手法とは異なり、本人指紋の拒否エラー率がほとんど変化することなく、他人指紋の受容エラー率のみが改善されることを示す。

キーワード 指紋認証, 指紋照合, 特徴点, 不一致信頼度

Fingerprint Verification using Reliability Evaluation of Non-matching Minutiae

Takahiro NAKAMURA[†] Takuji MAEDA[†] and Masahito MATSUSHITA[†]

[†]Advanced R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661 Japan

E-mail: [†]{Nakamura.Takahiro@ah, Maeda.Takuji@dh, Matsushita.Masahito@ak}.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract The fingerprint identification system is widespread most as the biometric technology with good balance of the performance and the cost. We report that we can improve the distinction performance of imposter fingerprint by evaluating the amount of "true" non-match minutiae, that means whether it is a true minutiae that does not have corresponding true minutiae of the other probed fingerprint. We also show experimental result that only the false match error rate is decreased without a drop of the false non-match error rate evaluation in contrast to conventional techniques that uniformly treat all non-match minutiae.

Keyword Fingerprint Identification, Fingerprint Matching, Minutiae, Non-matching Reliability

1. はじめに

情報化社会の進展や治安の問題を背景に、入退室管理や情報システムをはじめ様々な分野において、人間の身体的特徴を利用した各種のバイオメトリクス認証技術が積極的に導入されるようになった。中でも、古くから万人不同、終生不変という特性が知られている指紋を用いた認証技術は、コストの性能のバランスがよく最も普及している。

指紋認証では、指をセンサに押し付けるなどして入力された指紋画像から、画像処理によって特徴情報を抽出し、データベースに登録済の特徴情報と比較照合して類似度を算出することで、本人と認証する。最も代表的な照合方式としては、特徴点照合方式が挙げられる[1][2]。特徴点照合方式では、図1のようにまず入力画像からノイズを取り除いて指紋の隆線（または谷線）を抽出し、特徴点またはマニューシャと呼ばれる、

線の分岐点と端点を特徴情報として得る。そして、位置や分岐方向などが登録特徴点と入力特徴点でよく一致するもの（一致特徴点）の割合などをもとに、類似度（照合スコア）を求めるという方式で、データ量が比較的少なく経時変化に強いという特長がある。しかし、すべての特徴点が正しく得られるとは限らないため、ノイズが原因で発生する偽の特徴点（擬似特徴点）や特徴点の抽出漏れがあっても、精度良く他人を拒否し本人を認証できるようにするための工夫が求められる。

ノイズの要因としては、多汗による指紋パターンのつぶれ、乾燥によるかすれ、しわ、傷、手荒れなどがあるが、ノイズが多い低品質の指紋画像では場所によりノイズが完全には除去できず、擬似特徴点や特徴点の抽出漏れが生じて一致特徴点が減少し、一致しない特徴点（不一致特徴点）が増加する。そしてこのよう

な特徴点の誤りがあるレベルを超えると、本人の指(本指)と認証できなくなると同時に、他人の指(他指)と特徴点の偶然一致する危険性が次第に増加する。

そこで照合精度を向上するための手法として、例えば一致特徴点の真偽を何らかの方法で評価して「信頼度」の値を付加し、信頼度の高い一致特徴点ほど高い重み付けを与えて照合スコアを求めることで、擬似特徴点の影響を減らす[3]という手法が知られている。しかしながら低品質の指紋画像において、真の一致特徴点数が、たまたま特徴点の配置が比較的似ている他指との一致特徴点数に近い水準にまで減少してくると、後述のように、一致特徴点の信頼度を用いただけではうまく他指と判定できなくなるといった問題がある。

本報告では、このように他指判定が難しいパターンに対しても、不一致特徴点に着目した新しい照合手法によって対応できることを示す。以下では、従来の特徴点照合処理と課題について概説した後、提案手法の原理を説明し、評価実験によってその原理を検証する。

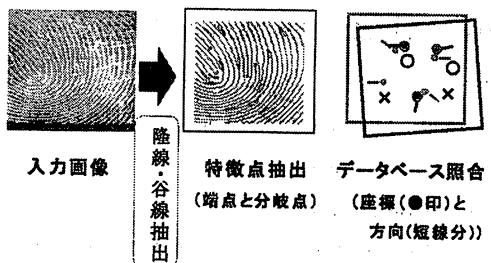


図1 指紋照合の概要(特徴点照合方式)

2. 従来の特徴点照合処理

はじめに、特徴点照合処理の流れについて概説する。そして、従来のような一致特徴点に着目する手法の限界について述べる。

2.1. 照合処理の概要

特徴点照合処理は、一般的に次のようなステップで行われる。

1. 入力側と登録側の指紋画像を位置あわせする。具体的には、特徴点や隆線の流れ方向が最も良く一致するような平行移動量や回転角を探索する。
2. 位置あわせの結果、入力・登録両方の指紋領域が重なり合う共通領域に含まれる特徴点をそれぞれ抽出する。(→入力特徴点, 登録特徴点とよぶ)
3. 入力特徴点と登録特徴点の座標や方向を比較し、一定以下の誤差で一致する特徴点を計数する。
4. 3の結果に基づき、所定の評価式を用いて両指紋画像の類似度(=照合スコア)を計算する。

5. 照合スコアが所定のしきい値より高ければ本指、そうでなければ未登録の他指と判定する。

照合スコアの基本的な考え方としては、次のような特徴点の一致率[2]がベースとなっていることが多い。

$$Score = 2K / (M+N) \quad \dots (1)$$

M: 登録側特徴点数, N: 入力側特徴点数

K: 一致特徴点数

なお確率論に基づく照合スコア[4]も提案されているが、不一致特徴点には注目されていない点では同じである。また、特徴点への信頼度付けには、次のような値が用いられる。

- A) 指紋登録時にユーザに指紋を複数回入力させ、特徴点抽出を複数回行って求めた、各特徴点の出現率[3]。(疑似特徴点はノイズの状態が変わると同一場所に出現しないため、出現率が低い。)
- B) 隆線の抽出処理時に得られる、特徴点付近の局所的な画質。(ノイズが少なくコントラストが高い領域ほど隆線が正しく抽出されやすく、そこから得られた特徴点も正しい可能性が高い。)

ここで、提案手法に関連の深い処理として、B)の画質による特徴点の信頼度づけについて説明する。

図2に、入力画像(a)および特徴点(b)、以下で説明する画質に基づく信頼度マップ(c)、信頼度マップと特徴点の重畳結果(d)を示す。なお参考として、図3に従来型の二値の指紋領域マスクを示す。図2と図3を比較すればわかるように、信頼度マップは画質によって重み付けされた指紋領域マスクであるともいえる。

信頼度マップは、1節で述べた隆線の抽出過程から得られる。隆線の抽出処理には様々な手法があるが、いずれにしても、ノイズが少なくコントラストの高い高画質領域では、隆線パターンに対応した大きな信号成分(=隆線パターン)が得られて隆線が正確に抽出され、ノイズが多いかコントラストが低い低画質領域になるほど、信号成分が小さくなり次第に隆線の誤りが増加する。そこでこのような処理の過程において、画素毎に信号成分の強度が算出されている部分に注目し、強度を正規化して取りだすと、信頼度マップが得られる。図2では、並行隆線フィルタと呼ばれる処理[5][6]を用いて生成した信頼度マップを示したが、この処理の場合は、信頼度として隆線のコントラストと並行性の高さが反映された値が得られている。図の(a),(c)を見ると、背景領域は0、低コントラストやノイズの多い領域、隆線の判別が目視で困難な領域などは低く、それ以外では高い値となるのがわかる。

この信頼度マップに(d)のように特徴点を重ね、その座標における信頼度を読み出すと、その特徴点の信頼度が得られる。例えば、(a)(d)の図中※で示す領域の特徴点は得られた信頼度の値が非常に低いが、その領域は手荒れのため真の特徴点と疑似特徴点の両方が混在しており、実際にもあまり信頼性がない。

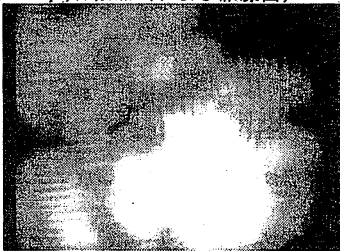
このようにして、式1の一致特徴点数 K や分母の M, N として、単純に一致特徴点の数量を用いる代わりに信頼度で $0.0 \sim 1.0$ の間で重み付けした数量を用いれば、疑似特徴点の影響が減少して特徴点一致率が向上する。ただし、極端な低品質指で高信頼度の特徴点が非常に少ない場合、逆に他指と一致する危険性が増すという一面には注意がいる。(極端な例として、高信頼度の特徴点が1個という他指同士は、100%一致となりやすい。)したがって、高信頼度の特徴点が一定率以上の指紋に限定して適用するなどの工夫は必要である。



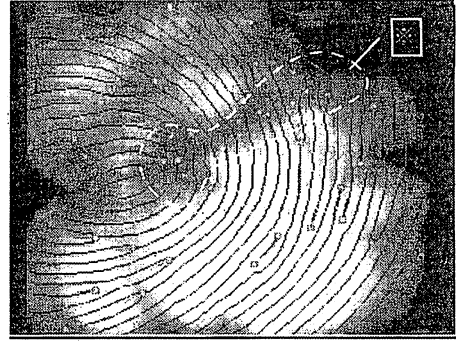
(a)入力画像



(b)特徴点 (および細線画)

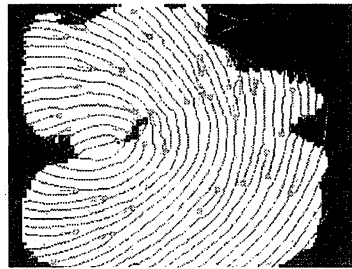


(c)信頼度マップ画像 (明度=信頼度, 黒=背景領域)



(d)特徴点を重畳

図2 信頼度マップと特徴点の関係



(e)通常の指紋領域 (疑似特徴点がマスク内に残る)



(f)指紋領域の判定を厳しくした場合 (真の特徴点がマスク外となり減少する)

図3 従来の指紋領域マスク画像 (特徴点を重畳)

2.2. 低品質指紋の照合における課題

次に、一致特徴点に基づく照合スコアでは、信頼度を利用して他指の判別が難しいパターンとはどのようなものかについて説明する。

図4に、特徴点の配置が似ており判別が難しい典型的なパターンを模式的に示す。(a)は位置あわせされた後の本指照合、(b)は位置あわせ処理によりそれらしい位置に合わせられた他指照合の様子である。また「登録画像」では信頼度つきの特徴点、「入力画像」では信頼度つきの特徴点と信頼度マップを示している。なお

説明上、信頼度は高、低、0の3段階とする。この例では、(a)と(b)は特徴点数が同じで、特徴点一致率も双方とも2個/8個=25%、信頼度の高い特徴点のみ用いた特徴点一致率も2個/5個=40%で同じのため、これらの数値をどのように組み合わせても、照合スコアの評価式が一致特徴点のみに基づく限り区別はできない。

しかしながら、下記のように不一致特徴点が生じる理由に注目すれば、(a)と(b)の間には明らかな差異があることがわかる。

(a) 本指照合の場合：

真の登録特徴点と不一致となるには、次のような何らかの理由が存在するはずである。

- i) 低画質により入力画像で特徴点を抽出できなかった (ut1, ut2, ut3)
- ii) 入力画像で座標が対応する領域が背景

したがって、図のように位置あわせした後、登録特徴点の座標に対応する入力側の信頼度マップを参照してみると、i)低信頼度もしくはii)値0となっているはずである。

(b) 他指照合の場合：

登録側と入力側の特徴点に相関性はなく、位置あわせの結果も偶然であることから、登録特徴点の座標に対応する入力側の信頼度を上記同様に参照すると、低画質の場合 (ut4) もあれば、高画質の場合 (ut5, ut6) もあるはずである。

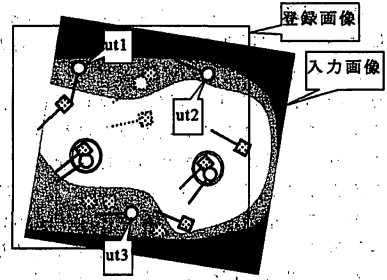
つまりこのようなパターンでは、本指と他指の差異は一致特徴点ではなく不一致特徴点にある。一致特徴点には注目するが不一致特徴点は一律に切り捨てる従来のアプローチで区別できないのはそのためである。

次節では上記の議論を元に、このようなパターンにおいても他指判別を可能とするための手法を提案する。

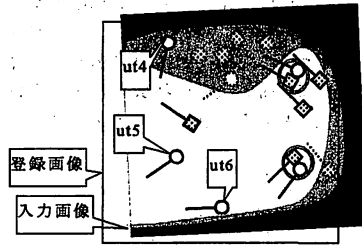
3. 不一致信頼度を用いた照合処理

前節の議論によって、特徴点の配置のよく似た他指の判別精度を向上するためには、理由無く不一致となった真の特徴点の有無を検証すればよいことがわかる。そこで提案手法では、理由無く不一致となった真の特徴点を「真の不一致特徴点」と定義し、各不一致特徴点について真の不一致特徴点らしさ=不一致信頼度を、照合相手側の指紋画像における信頼度マップを参照することによって求める。そして、その不一致信頼度を負のスコアとして照合スコアに反映し、不一致特徴点の多い他指の特徴点一致率を低下させる。

本手法では、特徴点の抽出結果に対して次のような仮説を立てる。A), C)は従来と同様であるが、B)のような考え方はこれまでになかったものである。



(a)本指照合



(b)他指照合

- 登録特徴点 (信頼度 高)
- 登録特徴点 (信頼度 低)
- 入力特徴点 (信頼度 高)
- 入力特徴点 (信頼度 低)
- ◎— 一致特徴点
- 入力画像の信頼度 (白:信頼度高, グレー:信頼度低, 黒:マスク (信頼度 0))

図4 特徴点照合の模式図

- A) 信頼度マップの高信頼度領域で抽出された特徴点は、真の特徴点である。
- B) 信頼度マップの高信頼度領域で特徴点が抽出されていない領域は、真の特徴点を含まない。
- C) 信頼度マップの低信頼度領域では、真の特徴点を含む場合もあれば、信頼度の値に応じて真の特徴点抽出の失敗や疑似特徴点の誤抽出もある。

ここで再び図4を用いて説明すると、登録側の不一致特徴点 (ut1~ut6) は仮説 B)によってつぎのように分類される。なお入力側信頼度マップの値は、位置あわせ後の登録側特徴点の座標に対応する位置の値とする。

- I. 特徴点信頼度=高, 入力側信頼度マップの値=高 (ut5, ut6) →真の不一致特徴点
- II. 特徴点信頼度=高, 入力側信頼度マップの値=低 (ut1, ut2, ut3, ut4)→疑似の可能性のある不一致特徴点
- III. 特徴点信頼度=低, 入力側信頼度マップの値=任

意 →疑似の可能性のある不一致特徴点

そして、ある入力指紋がもしケースIIにあてはまる「真の不一致特徴点」を数多く含んでいれば、たとえ一致特徴点の率が高くて他指である、と判定すればよい。

具体的には、例えば以下に示すようなアルゴリズムで実現することができる。

1. 登録指紋と入力指紋の位置あわせを行う。指の変形を無視すれば、次式を満たす R, D を得る。

$$X_p = R X_g + D \quad \dots(2)$$

X_g : 登録画像の座標系

X_p : 入力画像の座標系

R : 回転行列, D : 平行移動ベクトル

2. 登録画像の i 番目の不一致特徴点 (座標 M_{g_i}) について、入力側の信頼度マップ $T_p(X_p)$ から入力側の信頼度を読み出し、不一致信頼度 $F_g(M_{g_i})$ を得る。(図5参照)

$$F_g(M_{g_i}) = T_p(R M_{g_i} + D) \cdot T_g(M_{g_i}) \quad \dots(3)$$

$T_g(X_g)$: 登録特徴点の信頼度

3. 真の不一致特徴点数を負のスコア S_u として評価する。不一致信頼度に対する重み関数 $W_u(x)$ は図6に示す。

$$S_u = - \sum_i W_u(F_g(M_{g_i})) \quad \dots(4)$$

4. 照合スコア $Score$ に3. を反映する。例えば通常の照合スコア S_m に対して加算する。

$$Score = S_m + S_u \quad \dots(5)$$

$$S_m = 2K / (M + N) \quad \dots(1')$$

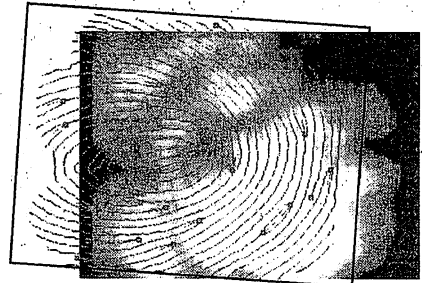
図5は2.の不一致信頼度の求め方の説明図であり、図2と同じ指から採取した別の指紋画像における特徴点(a)を、図2の指紋画像と位置あわせした後(e)の信頼度マップに重畳した様子である。*に含まれる3つの特徴点のうち左の2個はノイズによる擬似特徴点で、図2(b)*に含まれる擬似特徴点と出方が異なるため照合時に不一致特徴点となるが、位置あわせによって図5(b)のように低信頼度領域と重ねられ、不一致信頼度としては低い値を得るため、負のスコアとしては小さな値となる。もし入力指紋が本指でなく他指であれば、多くの不一致特徴点が信頼度マップの高信頼度領域と(高信頼度領域の面積比に応じた確率で)重なり、高い不一致信頼度の値を得て負のスコアを押し上げる。

以上のような判定方法を用いることによって、真の不一致特徴点を他指らしさを示す負の評価値として利

用し、特徴点の配置のよく似た他指でも判別精度を向上することができる。なおこれまでの議論は、登録指紋と入力指紋の役割を入れ替えても成り立つことから、登録指紋と入力指紋の両方で特徴点の信頼度評価と信頼度マップ生成を行い、双方向で不一致特徴点評価を行うことができれば、より高精度な照合が期待できる。



(a)図2と同じ指から得た別の特徴点



(b)図2の信頼度マップと重畳

図5 相手側画像からの信頼度読み出し(本指)

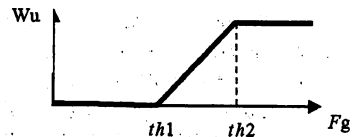


図6 不一致信頼度に対する重み関数

4. 評価実験

最後に評価実験により、提案手法による他指判定の精度向上効果を示す。

実験データとしては、独自に採取した約800指の指紋画像データベースを用いた。また特徴点の抽出処理には、文献[1]と[5]の手法を用いて隆線パターン抽出から特徴点抽出までの処理を行った。そして2.1節で述べたように、隆線パターンの抽出過程から信号強度成分を取り出し、信頼度マップを生成した。また本実験では、データ量が少なくすむという特徴点照合方式の利点を損なわないよう、信頼度マップの空間分解能

を 1/16 に圧縮し、信頼度の階調数も、図 6 における $th1, th2$ を同値として 1.0(高), 0(低)の二値に圧縮した。これにより本実験においては、指紋画像は正に図 4 のように、i)無効または背景領域、ii)高信頼度領域、iii)低信頼度領域に三分される。

照合スコアとしては、提案手法の特性がよくわかるようシンプルな式(1')の特徴点一致度を用いた。登録側データとしては、各指とも 3 試行分の登録用画像から特徴点抽出を行い、式(3)の特徴点信頼度 T_g も、各特徴点の出現頻度 (0/3~3/3 回) を調べて頻度 3 の特徴点のみ値 1.0 とした。入力側データとしては、7 試行分の画像を 1 枚ずつ使い、特徴点抽出と信頼度マップ生成を行った。そして入力側特徴点には信頼度付加をせず、登録側の不一致特徴点についてのみ、不一致特徴点に対する処理を適用した。

図 7 に、(1)従来手法 (特徴点一致度スコア)、(2)提案手法 (不一致信頼度の高い不一致特徴点のみ負のスコアとして反映)、参考として(3)比較手法 (不一致信頼度を用いず全不一致特徴点を負のスコアとして反映)、による照合スコアの度数分布を示す。図のように提案手法(2)では、他指のスコア分布は左にシフトするが、本指のスコア分布は(1)とほとんど変わっていないことがわかる。一方、比較手法(3)では、他指の分布が左に大きくシフトしたものの、本指の分布も同時に左にシフトしており、不一致信頼度を用いなければ本指照合にも影響してしまうことがわかる。

次に、図 8 に FMR (他指受容エラー率) と FNMR (本指拒否エラー率) を示す。図 7 と同じく、(2)ではしきい値の極端に低い領域を除き FNMR は(1)とほとんど変わらないまま、FMR のみが左にシフトした。(3)ではやはり、FMR, FNMR ともに左にシフトしてしまっている。例えば EER (等価エラー率) で比較すると、(1)と比べ(2)は 61% に低減され精度向上が見られるが、(3)は 94% にしか低減されず、精度はほとんどかわらない。以上により、不一致信頼度が原理どおり他指判定精度に寄与することが示された。

5. おわりに

他指判定精度の向上策として、従来注目されていなかった不一致特徴点に対して、真の不一致特徴点らしさを示す「不一致信頼度」を評価し、負のスコアとして照合に利用するという手法を提案した。そして実験によって、他指の判定精度向上による照合性能への寄与が確認された。

今後は、より実用的な照合スコア評価式へ提案手法を組み入れた場合の評価実験と改良を行っていく予定である。

文 献

- [1] 笹川耕一, 磯貝文彦, 池端重樹, “低品質画像への対応能力を高めた個人確認用指紋照合装置,” 信学論(D-II), vol.J72-D-II, no.5, pp.707-714, May 1989.
- [2] 若原徹, 木村義政, 鈴木章, 塩昭夫, 佐野陸夫, “指紋隆線方向分布とマニューシャ対応付けを用いた指紋照合,” 信学論 (D-II), Vol.J86-D-II, No.1, pp.63-71, Jul.2003
- [3] 大和一晴, 中島恭一, 橋本哲, 上薄徹, 伊達一明, “基準指紋の各特徴点の確からしさをを用いて重み付けした指紋照合方式,” 画像電子学会論文誌, Vol.17, No.5, pp.393-400, 1988
- [4] A.Monden, S.Yoshimoto, “Fingerprint Identification Using the Accidental Coincidence Probability,” Proc. MVA2002, pp.124-127, Dec.2002
- [5] 中村高宏, 藤原秀人, 広岡美和子, 鷺見和彦, “並行隆線フィルタ法による指紋画像の隆線強調処理,” 信学技報(PRMU), no. 65, pp.47-52, Jul.2003
- [6] T.Nakamura, M.Hirooka, H.Fujiwara, K.Sumii, “Fingerprint Image Enhancement Using a Parallel Ridge Filter,” Proc.17th ICPR 2004, pp.536-539, Aug.2004

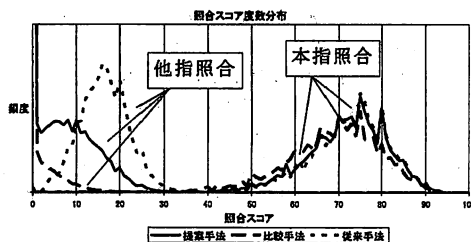


図 7 照合スコア度数分布

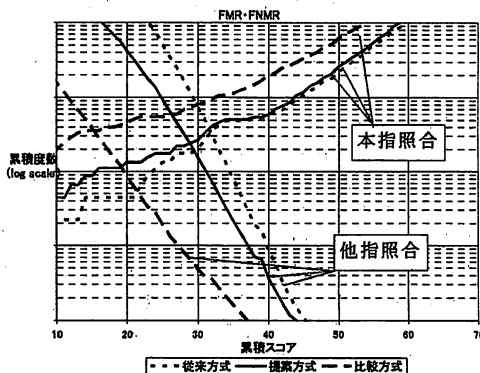


図 8 FMR, FNMR 分布 (EER 付近)